

Werner Schnorrenberg

Nichtlineare Verzerrungen – richtig gemessen

Störsignale wie z. B. Intermodulationsprodukte können die Übertragungsqualität der Nutzsignale erheblich beeinflussen und müssen daher für viele Applikationen meßtechnisch erfaßt werden. Hier ein kompakter „Refresher“ zu diesem Thema.

Der nutzbare Dynamikbereich eines Übertragungsvierpols – z. B. eines Verstärkers oder Mischers – wird zu kleinen Pegeln hin durch das Eigenrauschen und in Richtung größerer Pegel durch das Auftauchen von Störsignalen begrenzt, die durch endliche Linearität des Übertragungsvierpols hervorgerufen werden.

Diese Störsignale sind Intermodulationsprodukte (IM) und Klirrpunkte (Oberwellen), die bei Aussteuerung des Vierpols oberhalb seines spezifizierten bzw. max. zulässigen Eingangspegels entstehen können.

Die durch nichtlineare Verzerrung (Kompression) entstehenden Oberwellen eines HF-Verstärkers (z. B. FM-Sender in C-Betrieb) können meist durch Tiefpaßfilterung auf ein Mindestmaß abgedämpft werden, so daß sie nicht mehr störend in Erscheinung treten.

Intermodulationsstörungen (IM) hingegen treten in direkter Nachbarschaft der Nutzsignale auf und können durch Filterung nicht mehr beseitigt werden.

Insbesondere die Übertragung amplitudenmodulierter Signale, wie z. B. Fernsehträger, AM und SSB, können durch Intermodulation erheblich gestört werden, wobei die Störungen sowohl im Sender als auch im Empfänger (z. B. Antennenverstärker) entstehen können. Für alle Messungen von nichtlinearen Verzerrungen eignet sich im besonderen Maß der Spektrumanalysator, wie nachfolgend gezeigt werden soll.

Zur Entstehung von Intermodulation

Allgemein gilt: Wird auf dem Eingang eines Übertragungsvierpols mit einer nichtlinearen Übertragungsfunktion mehr als ein Signal gegeben (Mehrton-Aussteuerung), dann treten am Ausgang durch Summen- und Differenzbildung der Nutzsignale zusätzliche Intermodulationsprodukte verschiedener Ordnungszahlen auf. Von diesen Störkomponenten interessieren in der

Praxis hauptsächlich die Intermodulationsprodukte dritter und fünfter (ungerader) Ordnung, weil diese in den engeren Bereich um die Nutzsignale fallen.

Für zwei Signalfrequenzen f_1 und f_2 entstehen nach Bild 1 IM-Störprodukte dritter Ordnung (IM₃) bei:

$$2 f_1 - f_2, 2 f_2 - f_1$$

und fünfter Ordnung (IM₅) bei:

$$3 f_1 - 2 f_2, 3 f_2 - 2 f_1$$

Eine gekrümmte Mischer- oder Verstärkerkennlinie (Bild 2) hat die allgemeine Form:

$$i = K_1 (U - U_K) + K_2 (U - U_K)^2 + K_3 (U - U_K)^3 + \dots$$

Das Ergebnis einer mathematischen Auflösung (Additionstheoreme) oder o. g. Potenzreihe – die zur Vereinfachung

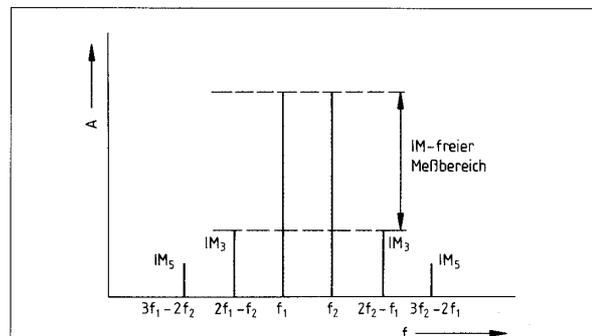


Bild 1. Definition der Intermodulation

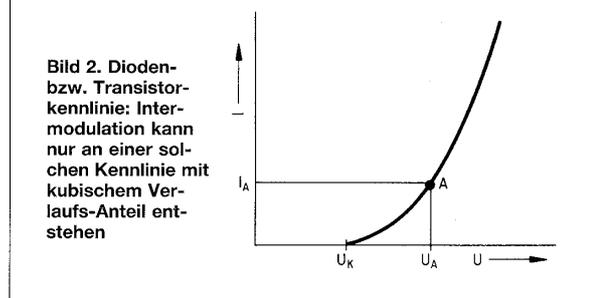
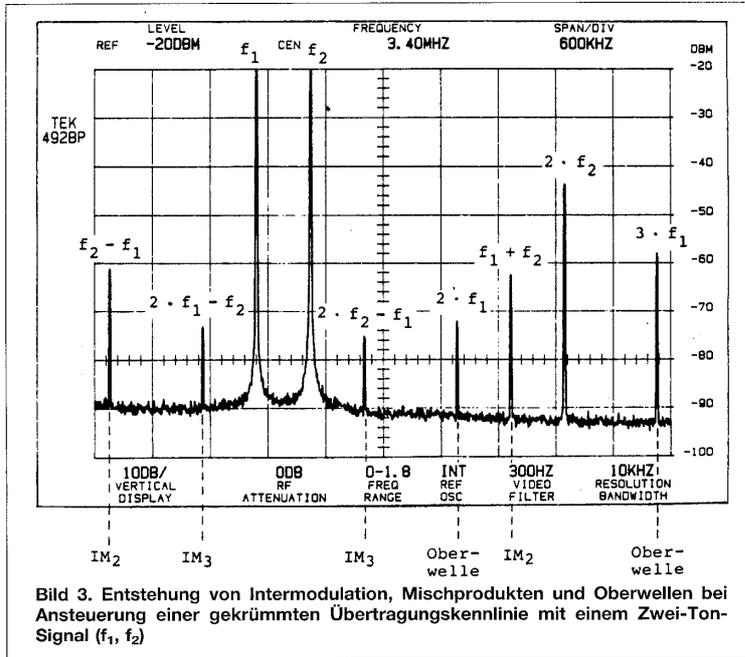


Bild 2. Dioden- bzw. Transistor-kennlinie: Intermodulation kann nur an einer solchen Kennlinie mit kubischem Verlaufs-Anteil entstehen

Messen und Testen



chung nach dem dritten Glied abgebrochen wurde – zeigt, daß Intermodulation und Kreuzmodulation (Modulationsübernahme) nur an einer gekrümmten Kennlinie mit kubischem Anteil entstehen können [1]. Am quadratischen oder linearen Teil der Kennlinie entstehen zu den Grundwellen nur Mischprodukte (Summen- und Differenzfrequenz) sowie die Oberwellen (Klirrfaktor) der Eingangssignale (Bild 3).

Der Intercept-Point: Maß für die Großsignalfestigkeit

Der „Intercept-Point“ (IP) ist ein Maß für die Großsignalfestigkeit eines linearen Verstärkers, Mixers oder auch Spektrumanalysators. IM-Verzerrungen sind amplitudenabhängig und wachsen mit steigenden Signalpegeln. Die Zunahme ist hierbei proportional zur Ordnungszahl der IM. Die Intermodulation dritter Ordnung ist eine Kombination der Grundwelle (1. Harmonische) des einen Signals mit der 1. Oberwelle (2. Harmonische) des anderen Signals. Die Summe der Harmonischen ergibt die Ordnungszahl.

Bei Änderung des Eingangspegels steigt der Pegel (dBm) der IM-Produkte dritter Ordnung theoretisch dreimal so schnell an wie der Pegel (dBm) der Eingangssignale. Der Intercept-Point (IP) ist der Wert, bei dem die Eingangssignale und das Intermodulationsprodukt den gleichen Pegel erreichen (Bild 4).

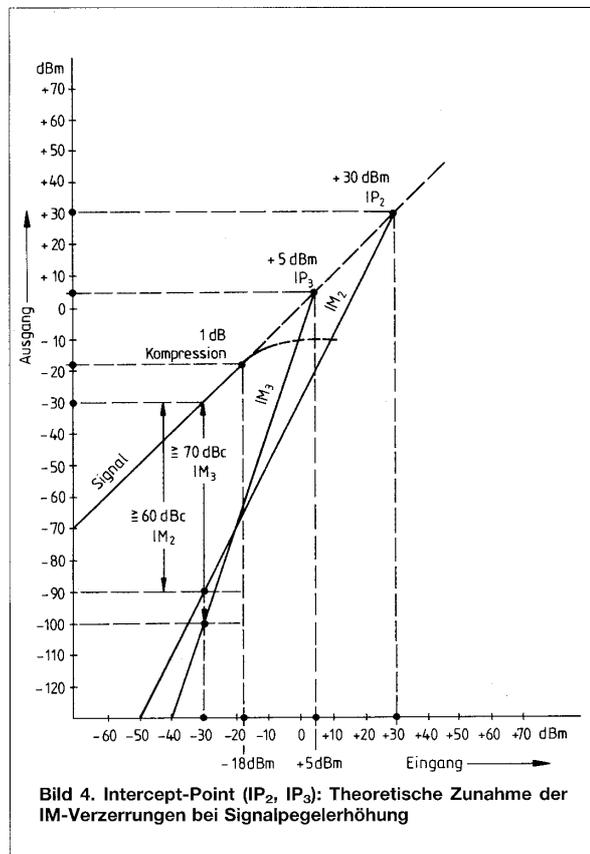
Dieser Wert ist ein rein theoretischer Wert, da bei solcher Übersteuerung des Vierpols zuvor Sättigungseffekte (Kompression) im zu testenden Gerät auftreten.

Bild 4 zeigt in grafischer Darstellung die theoretische Zunahme der IM-Verzerrungen bei Signalpegelerhöhung an einem typischen Spektrumanalysator. Bei -30 dBm Signalpegel (f_1, f_2) ist der Abstand für IM_3 größer als 70 dBc und für IM_2 größer als 60 dBc. Die 1-dB-Kompression des 1. Mixers stellt sich bei ca. -18 dBm ein. Bei Veränderung der Übertragungskennlinie ergeben sich die theoretischen Schnittpunkte (Intercept-Points) für IP_3 bei $+5$ dBm und IP_2 bei $+30$ dBm.

Der Intercept-Point für beliebige Eingangssignale kann nach dieser Grafik wie folgt bestimmt werden:

$$IP = \Delta IM / (N - 1) + P_e \quad (1)$$

IP = Intercept-Point (dBm)
 ΔIM = Intermodulationsabstand in dB, bezogen auf die Pegel der Eingangssignale
 N = Ordnungszahl
 P_e = Pegel der Eingangssignale (dBm)



Messen und Testen

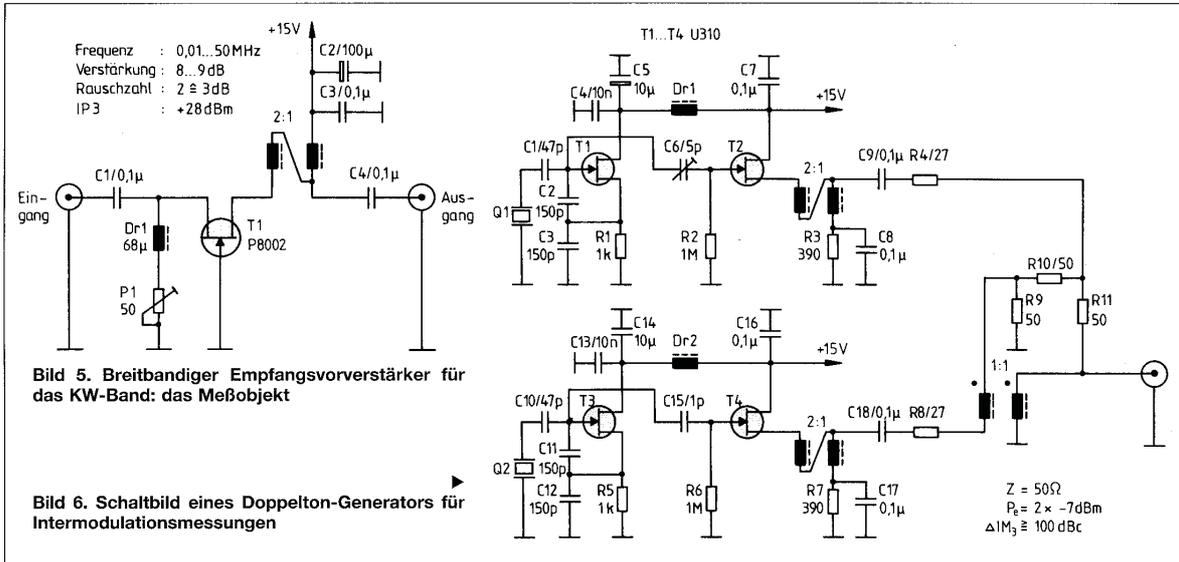
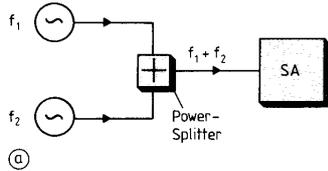


Bild 5. Breitbandiger Empfangsvorverstärker für das KW-Band: das Meßobjekt

Bild 6. Schaltbild eines Doppelton-Generators für Intermodulationsmessungen



Ein Meßbeispiel: HF-Verstärker

Es sollen die IM-Verzerrungen (Großsignalfestigkeit) des breitbandigen, „linearen“ HF-Antennenverstärkers aus Bild 5 gemessen werden und daraus der IP₃ sowie der max. zur Verfügung stehende verzerrungsfreie Dynamikbereich des Verstärkers berechnet werden.

Zum Test werden zwei Signale ($f_1 = 8,855$ MHz, $f_2 = 8,945$ MHz) gleichen Pegels (-5 dBm = 126 mV) verwendet. Bei Zusammenführung der Signale (Power Splitter) ist unbedingt darauf zu achten, daß sich die Signalquellen nicht gegenseitig modulieren, d. h. die Generatoren selbst IM-Produkte erzeugen! Dies läßt sich nur durch entsprechend hohe Dämpfung der Signalausgänge zueinander verhindern. Das Schaltbild eines geeigneten 2-Ton-Generators mit $IM_3 > 100$ dB und einer Entkoppelung der Signalquellen von > 40 dB mit Hilfe einer Wheatstone-Brücke zeigt Bild 6.

Von der eigentlichen Messung muß die IM-Festigkeit des gesamten Meßsystems geprüft werden. Dazu wird zunächst der 2-Ton-Generator direkt mit dem Spektrumanalysator verbunden (Bild 7a). Als ein optimales Resultat zeigt Bild 7b neben den eigentlichen Signalen (f_1, f_2) einen intermodulationsfreien Meßbereich des Meßsystems von > 84 dB. Bei Bedarf kann durch Verkleinerung der Auflösungsbandbreite des Spektrumanalysators der dynamische Meßbereich auf bis zu 100 dB erweitert werden. (Abhängig von der Qualität des Analysators.)

Anschließend wird der zu testende HF-Verstärker zwischen 2-Ton-Generator und Spektrumanalysator geschaltet. Bild 8a zeigt den Meßaufbau und Bild 8b die Ergebnisse der Spektrumanalyse. Folgende Meßergebnisse können aus dem Schirmbild direkt abgelesen werden:

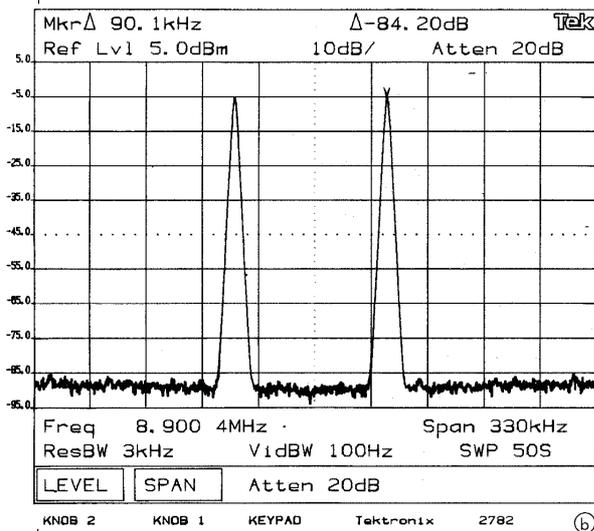


Bild 7. Meßaufbau zur Bestimmung der verzerrungsfreien Dynamik des Meßsystems (a) und Ergebnis der Spektrumanalyse (b)

Messen und Testen

1. Die vom HF-Verstärker produzierten IM_3 -Störprodukte haben zu den Nutzsignalen einen Abstand von $\Delta IM_3 = 60 \text{ dB}$

2. Die Verstärkung beträgt 9 dB

$$G_p = 9 \text{ dB}$$

Aus Gleichung (1) berechnet sich der IP_3 zu

$$\begin{aligned} IP_3 &= \Delta IM/2 + P_e \\ &= 60 \text{ dB}/2 + (-5 \text{ dBm}) \\ &= +25 \text{ dBm} \end{aligned}$$

Mit Hilfe des IP_3 -Wertes und der Rauschzahl läßt sich dann eine Aussage über den nutzbaren Dynamikbereich des Verstärkers machen. Laut Definition ist die obere Grenze der Aussteuerung dann erreicht, wenn die Pegel der IM -Störprodukte gleich dem Empfindlichkeits-Rauschpegel des Verstärkers sind ($S + N/N = 3 \text{ dB}$) [2].

Durch Umformung von Gleichung (1) läßt sich die maximale Eingangsstörleistung ($P_{e \max}$) für verzerrungsfreien Betrieb ermitteln

Dipl.-Ing. W. Schnorrenberg, geboren in Köln, studierte Nachrichtentechnik, begann 1976 bei Rohde & Schwarz, Bereich Service Funktechnik und wechselte 1979 in den R&S-Vertrieb Meßtechnik. Seit 1982 ist er Mitarbeiter der Tektronix GmbH, Köln, und dort als Sales Program Manager verantwortlich für die Tektronix-Hochfrequenzmeßtechnik. Nebenher ist er Dozent an der Technischen Akademie Esslingen.



$$P_{e \max} = \frac{1}{3} (2 \cdot IP_3 + P_{e \text{st}}) \quad (2)$$

mit

$P_{e \text{st}}$ = Auf den Eingang bezogene Ausgangsstörleistung ($P_{a \text{st}}$)

$$P_{e \text{st}} = P_{a \text{st}} - G_p$$

Für $P_{e \text{st}}$ wird die Empfindlichkeitsschwelle (S) des Verstärkers eingesetzt. Aus dem Datenblatt entnimmt man hierzu die Rauschzahl des verwendeten FETs zu:

$$F = 2 \triangleq 3 \text{ dB}$$

und erhält eine Empfindlichkeitsschwelle von

$$S = -174 \text{ dBm/Hz} + 3 \text{ dB} = -171 \text{ dBm/Hz}$$

mit

$$-174 \text{ dBm/Hz} = \text{natürliche Rauschschwelle an } 50 \Omega \text{ in } 1 \text{ Hz Bandbreite und } -290^\circ \text{ K}$$

Damit berechnet sich die Eingangsleistung von zwei Signalen, deren IM_3 -Produkte die Empfindlichkeitsschwelle erreichen nach (2) zu

$$P_e = \frac{1}{3} (50 - 171) \text{ dBm} = -40 \text{ dBm}$$

Intermodulationsfreier Dynamikbereich:

$$\begin{aligned} \Delta IM &= P_{e \max} - S \\ &= (-40 + 171) \text{ dBm} = 131 \text{ dB} \end{aligned}$$

Dieser Dynamikumfang bezieht sich auf eine theoretische Rauschbandbreite von 1 Hz. In der Praxis werden Empfangsbandbreiten mit $> 1 \text{ Hz}$ verwendet. Wird z. B. ein SSB-Empfänger mit einer ZF-Bandbreite (Rauschbandbreite) von 2,4 kHz eingesetzt, vergrößert sich das Grundrauschen um den Betrag

$$10 \log 2400 \triangleq 34 \text{ dB}$$

Die max. Eingangsleistung wird zu

$$P_{e \max} = \frac{1}{3} (50 - 137) \text{ dBm} = -29 \text{ dBm}$$

und der IM -freie Dynamikbereich reduziert sich auf

$$\Delta IM = (-29 + 137) \text{ dB} = 108 \text{ dB.}$$

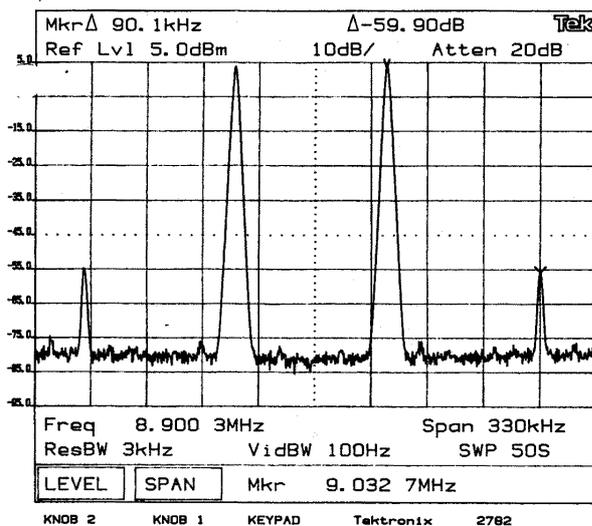
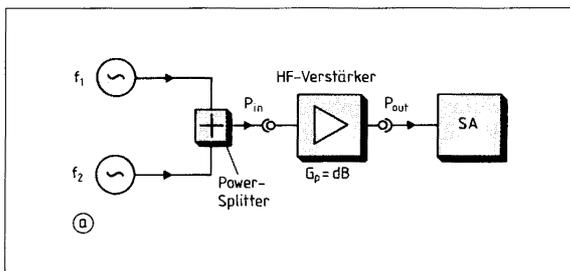


Bild 8. Meßaufbau zur Bestimmung der IM_3 -Verzerrungen und der Leistungsverstärkung bzw. Dämpfung eines Vierpols (a) und Meßergebnis der Spektrumanalyse (b)

Literatur

- [1] Schnorrenberg, W.: Spektrumanalyse, Theorie und Praxis. Vogel Verlag, Würzburg.
- [2] Schnorrenberg, W.: Rauschmessungen mit dem Spektrumanalysator. Mikrowellen & HF Magazin, 2/90. Sprechsaal Verlag, Coburg.